

SINTESIS DAN KARAKTERISASI ZEOLIT ANALSIM MENGGUNAKAN PREKURSOR SILIKA DARI LIMBAH KACA

Muhammad Kafillah^{1*}, Nurlina¹, Andi Hairil Alimuddin¹

¹Program Studi Kimia, Fakultas MIPA, Universitas Tanjungpura,
Jl. Prof. Dr. H. Hadari Nawawi,

* email: muhammadkafillah91@gmail.com

ABSTRAK

Dalam penelitian ini, limbah kaca yang mengandung SiO₂ dimanfaatkan sebagai prekursor dalam sintesis zeolit. Zeolit analsim tergolong zeolit sintetik dengan rasio Si/Al yang tinggi, sehingga berpotensi untuk digunakan sebagai katalis. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik zeolit analsim yang disintesis dengan prekursor silika dari limbah kaca dan mengetahui kinerja zeolit analsim sebagai katalis dalam perengkahan minyak jelantah. Zeolit analsim disintesis dengan rasio molar Si/Al = 100, H₂O/Si = 11,69, NaOH/Si = 0,14 dan TPA-Br/Si = 0,086. Sintesis dilakukan menggunakan autoclave hidrotermal pada suhu 150°C dan 190°C selama 4 hari. Difraktogram XRD menunjukkan zeolit analsim yang disintesis pada suhu 150°C memiliki posisi 2θ yang lebih mendekati zeolit analsim standar yaitu pada 2θ: 15,74°; 25,89°; 30,48° dan berbentuk struktur kristal berupa cubic. Analisis dengan FTIR menunjukkan penyerapan pada bilangan gelombang 661,95 cm⁻¹ (vibrasi tetrahedral T-O, T=Si/Al), 999,25 cm⁻¹ (vibrasi asimetris T-O) dan 3440,61 cm⁻¹ (O-H stretching). Berdasarkan hasil yang diperoleh, zeolit analsim dapat disintesis dengan prekursor silika dari limbah kaca.

Kata kunci: limbah kaca, silika, zeolit analsim

PENDAHULUAN

Limbah kaca (*waste glass*) merupakan salah satu limbah padatan dari hasil pengolahan industri kaca. Produksi kaca dihasilkan di Indonesia mencapai 1,45 juta ton pertahun (Hariyanti, 2015). Peningkatan produksi kaca akan meningkatkan jumlah limbah padat yang berupa serpihan-serpihan kaca yang berbahaya apabila terkena kulit manusia. Limbah kaca sudah banyak dimanfaatkan, namun masih terdapat banyak peluang untuk mengeksplorasi pemanfaatan limbah kaca.

Sejauh ini pemanfaatan limbah kaca adalah sebagai bahan campuran untuk pembuatan material bahan bangunan dan campuran penjernih air. Beberapa peneliti telah memanfaatkannya sebagai bahan campuran beton (Ali and Al-Tersawy, 2012), bahan campuran aspal (Arabani, 2011), bahan baku pembuatan resin penukar ion (Coleman *et al.*, 2013) dan sebagai media filtrasi air (Korkosz *et al.*, 2012). Pemanfaatan limbah kaca dapat lebih digali berhubungan dengan kandungan kimia limbah kaca tersebut. Seperti yang telah dilaporkan oleh Coleman *et al.* (2013) dan Zhu *et al.* (2009) bahwa kandungan terbesar

di dalam limbah kaca yaitu silika (SiO₂). Hampir 70% limbah kaca didominasi oleh kandungan silika oksida (SiO₂) (Jin *et al.*, 2000). Kandungan silika yang tinggi pada limbah kaca dapat diolah menjadi silika gel melalui pembentukan natrium silikat dalam prekursor sintesis zeolit analsim.

Zeolit analsim merupakan jenis zeolit sintetik dengan rasio mol Si/Al tinggi (Si/Al=10-100) (Azizi *et al.*, 2014 ; Mozgawa *et al.*, 2011). Tingginya rasio mol Si/Al menyebabkan pembentukan kristal yang lebih tinggi dan perubahan sifat lebih hidrofobik pada zeolit analsim yang dapat berperan sebagai katalis dalam penggunaan di beberapa industri, seperti industri petrokimia. Selain itu, zeolit analsim dalam industri air berfungsi sebagai penukar kation dan penyaring ion sedangkan dalam industri nuklir berfungsi sebagai pengolahan limbah nuklir dan penyerap radioisotop (Juniantoro *et al.*, 2014).

Beberapa hasil penelitian tentang zeolit analsim telah banyak dilakukan dengan sumber silika yang berbeda. Salah satunya Shiralkar and Clearfield (1989) melaporkan sintesis zeolit analsim menggunakan sumber silika dari kaolin dengan perbandingan rasio molar 10Na₂O: 100SiO₂ :

$2\text{Al}_2\text{O}_3 : 1800\text{H}_2\text{O} : 20\text{TPABr}$ pada suhu 190°C selama 40 jam. Fabiani (2014) melaporkan hasil sintesis zeolit analsim menggunakan sumber silika dari abu sekam padi dengan perbandingan rasio molar $100\text{SiO}_2 : 0,005\text{Al}_2\text{O}_3 : 11,69\text{H}_2\text{O} : 0,14\text{Na}_2\text{O} : 0,086\text{TPABr}$ mampu menghasilkan zeolit analsim pada suhu 150°C selama 96 jam.

Pada penelitian ini sintesis zeolit analsim menggunakan prekursor silika dari limbah kaca dilakukan pada dua keadaan suhu yaitu 150°C dan 190°C untuk meninjau hubungan suhu dengan kristalinitas zeolit analsim sintetis. Zeolit analsim sintetis dikarakterisasi dengan XRD dan FTIR.

METODOLOGI PENELITIAN

Alat dan Bahan

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini antara lain: ayakan 200 *mesh*, *hotplate*, neraca analitik, oven, seperangkat alat gelas kimia, tanur, *Fourier Transform Infrared* (FTIR) (Shimadzu IRPrestige21), *X-Ray Fluorescence* (XRF) (Panalytical Epsilon3), dan *X-Ray Diffraction* (XRD) (XPERT-PRO Diffractometer).

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah limbah kaca yang berasal dari toko Meubel Kota Pontianak. Bahan-bahan kimia yang digunakan antara lain akuades, padatan natrium aluminat (NaAlO_2) (merck), padatan natrium hidroksida (NaOH) (merck) dan padatan tetrapropilamoniumbromida (TPABr) (sigma-aldrich).

Prosedur Penelitian

Preparasi sampel limbah kaca

Limbah kaca terlebih dahulu dibersihkan dan dikeringkan. Limbah kaca yang telah kering didestruksi hingga menjadi serbuk halus, selanjutnya diayak dengan saringan 80-100 *mesh* (Safitri, 2012). Komposisi kimia dari limbah kaca kemudian dianalisis menggunakan XRF.

Ekstraksi silika dari limbah kaca

Sebanyak 100 gram serbuk kaca halus ditambahkan larutan NaOH 3M dilarutkan dalam 150 mL. Campuran dipanaskan hingga sebagian besar air menguap. Campuran kemudian dimasukkan ke dalam tanur pada suhu 400°C selama 4 jam.

Padatan tersebut kemudian dianalisis menggunakan XRF (Safitri, 2012).

Sintesis zeolit analsim dengan metode hidrotermal

Sintesis zeolit analsim dilakukan merujuk dari metode Fabiani (2014) menggunakan prekursor utama silika dari limbah kaca, padatan natrium aluminat, senyawa organik pengarah struktur yaitu TPABr dan akuades. Rasio molar yang digunakan yaitu $\text{Si/Al} = 100$, $\text{H}_2\text{O/Si} = 11,69$, $\text{NaOH/Si} = 0,14$ dan $\text{TPA-Br/Si} = 0,086$. Selanjutnya membuat larutan A dan B dari bahan yang sudah disiapkan. Larutan A dibuat dengan melarutkan 7,6845 gram TPABr ke dalam akuades dan larutan B dibuat dengan melarutkan 0,2752 gram NaAlO_2 ke dalam larutan NaOH 1M lalu diaduk selama 1 jam. Setelah dilakukan pengadukan pada larutan A dan B, larutan A dipindahkan ke dalam larutan B dalam posisi *stirrer* masih berputar. Selama pengadukan, ditambahkan sedikit demi sedikit ekstraksi silika dari limbah kaca sebanyak 24,5454 gram dan dimasukkan ke dalam *autoclave* dengan metode hidrotermal. Sintesis yang dilakukan menggunakan suhu 150°C selama 96 jam. Campuran akhir yang dihasilkan berupa larutan yang terdapat endapan berwarna coklat. Padatan yang terbentuk dari hasil reaksi tersebut, disaring dan dicuci dengan akuades hingga netral. Kemudian dikeringkan dalam oven pada temperatur 100°C selama 3 jam. Selanjutnya untuk meningkatkan kristalinitas, padatan yang telah kering dipanaskan kembali ke dalam tanur pada temperatur 540°C selama 6 jam. Produk sintesis yang diperoleh dikarakterisasi kristalinitasnya menggunakan XRD dan analisis gugus fungsi dilakukan menggunakan FTIR.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Limbah Kaca Sebagai Prekursor Silika

Penelitian ini menggunakan bahan dasar dari limbah kaca yang tidak berwarna dan berbentuk lembaran. Limbah kaca terlebih dahulu dibersihkan untuk menghilangkan pengotor yang menempel pada permukaan kaca. Limbah kaca dihaluskan dan diayak dengan ukuran 180-200 *mesh* agar dihasilkan serbuk kaca dan homogen yang berdampak pada meningkatnya luas

permukaan. Luas permukaan yang semakin besar akan meningkatkan peluang terjadinya kontak serbuk kaca dengan pelarut sehingga proses ekstraksi silika dapat berjalan maksimal. Analisis XRF pada serbuk kaca memberikan informasi senyawa mayor yang terkandung yaitu silika dioksida (SiO_2). yakni sebesar 81,342%.

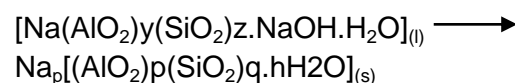
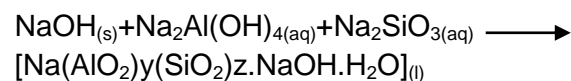
Serbuk kaca yang digunakan untuk ekstraksi silika dicampurkan dengan larutan NaOH sambil diaduk dan disertai dengan pemanasan untuk menguapkan air pada campuran tersebut. Penggunaan larutan NaOH sebagai pelarut dikarenakan SiO_2 hanya larut dalam alkali hidroksida dan leburan-leburan karbonat (Handoyo, 1996). Reaksi antara serbuk kaca dengan NaOH berlangsung pada suhu 400°C selama 3 jam. Hasil ekstraksi berupa padatan berwarna abu-abu. Berdasarkan analisis XRF, dihasilkan peningkatan kandungan SiO_2 menjadi sebesar 82,03%. Limbah kaca hasil preparasi berpotensi untuk dijadikan sebagai prekursor silika dalam sintesis zeolit.

Sintesis Zeolit Analsim

Sintesis zeolit analsim dilakukan menggunakan metode hidrotermal dan sol-gel. Metode sol gel merupakan metode yang digunakan untuk mensintesis material oksida dari larutan prekursor yang dilakukan pada suhu rendah, dimana dalam proses tersebut terjadi perubahan fasa dari suspensi koloid (sol) membentuk fasa cair (gel) (Schmidt, 1988). Metode sol-gel adalah juga diharapkan dapat menghasilkan derajat kristanilitas dan kemurnian yang tinggi dari zeolit analsim yang akan disintesis. Tahapan yang dilakukan dalam penelitian ini adalah pencampuran bahan, kristalisasi (hidrotermal), pencucian zeolit dan pengeringan.

Komposisi rasio molar yang digunakan merujuk pada penelitian Fabiani (2014) yaitu dengan perbandingan campuran $1 \text{ SiO}_2 : 0,005 \text{ Al}_2\text{O}_3 : 0,14 \text{ NaOH} : 0,086 \text{ TPABr} : 11,69 \text{ H}_2\text{O}$. Campuran dimasukkan ke dalam wadah tertutup *autoclave* untuk proses sintesis zeolit secara hidrotermal. Tujuan perlakuan secara hidrotermal adalah agar proses kristalisasi dapat berlangsung secara maksimal. Tujuan lainnya adalah untuk menyeragamkan kristal yang terbentuk dan menyempurnakan pertumbuhan kristal zeolit (Warsito, et al., 2008). Kristalisasi pada

pembentukan zeolit dicapai dari fasa larutan menjadi fasa padatan yang dapat dilihat dari reaksi di bawah ini (Zhely dan Widiastuti, 2012):



Suhu yang digunakan dalam proses sintesis zeolit analsim adalah 150°C dan 190°C selama 96 jam. Berdasarkan penelitian Chester and Derouane (2009) melaporkan pertumbuhan inti kristal zeolit analsim terbentuk dari fasa amorf ke fasa kristal dapat terjadi selama 96 jam. Tujuannya ialah untuk membandingkan dan mengoptimalkan pembentukan kristal dari zeolit yang terbentuk.

Kristal zeolit dicuci dengan akuades untuk menghilangkan material selain zeolit yang mungkin ada pada saat pembentukan zeolit sampai pH netral. Tahap terakhir yakni pengeringan untuk menguapkan air yang terperangkap dalam pori-pori zeolit. Setelah dikeringkan, kemudian padatan putih dikalsinasi pada suhu 540°C selama 6 jam. Tujuannya untuk menghilangkan *template* organik dan meningkatkan kristalisasi dari padatan zeolit yang terbentuk. Produk sintesis zeolit yang terbentuk berupa padatan dan berwarna putih.

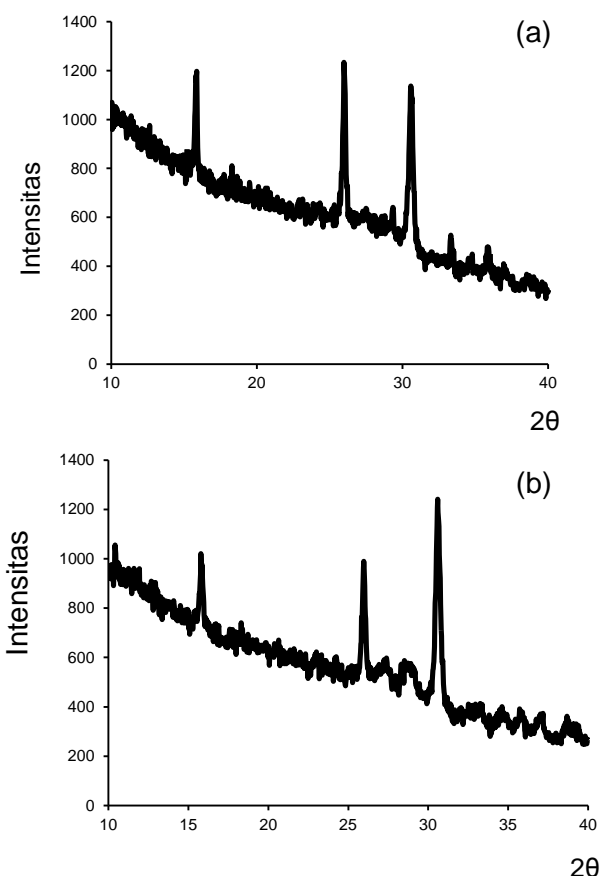


Gambar 1. Hasil sintesis zeolit analsim

Karakterisasi Zeolit Analsim dengan X-Ray Diffraction

Zeolit sintetik yang telah diperoleh dari hasil penelitian dianalisis dengan XRD. Analisis dengan XRD bertujuan untuk mengidentifikasi kristanilitas material serta analisis fasa kristalin secara kualitatif maupun kuantitatif. Difraktogram XRD zeolit yang disintesis pada suhu 150°C dan 190°C dapat dilihat pada Gambar 2.

Difraktogram XRD zeolit hasil sintesis pada suhu 150°C menunjukkan pola difraktogram cenderung membentuk fasa kristal dengan puncak tertinggi pada posisi $2\theta=15,85^\circ$; $26,01^\circ$; $30,61^\circ$. Hal yang membuktikan terbentuknya fasa kristal adalah intensitas dan jenis kristal yang berupa bentuk *cubic*. Hal ini bersesuaian juga dengan penelitian dari Waluyo *et al.* (2013) yang melaporkan bahwa zeolit analsim terbentuk dari struktur kristal yakni dalam bentuk *cubic*. Hasil sintesis pada suhu 190°C menunjukkan pola difraktogram dengan puncak tertinggi pada posisi $2\theta=15,79^\circ$; $25,97^\circ$; $30,57^\circ$. Namun, struktur kristal yang terbentuk adalah tetragonal. Hal ini dikarenakan sintesis zeolit analsim dengan suhu 190°C sudah masuk ke dalam fase metastabil dalam pembentukannya. Berdasarkan Weitkamp dan Puppe (1999) melaporkan zeolit analsim adalah fase metastabil dimana jika waktu sintesis diperpanjang maka fasa analsim akan berubah menjadi zeolit lain yang tergantung pada metode dan bahan baku sintesisnya.



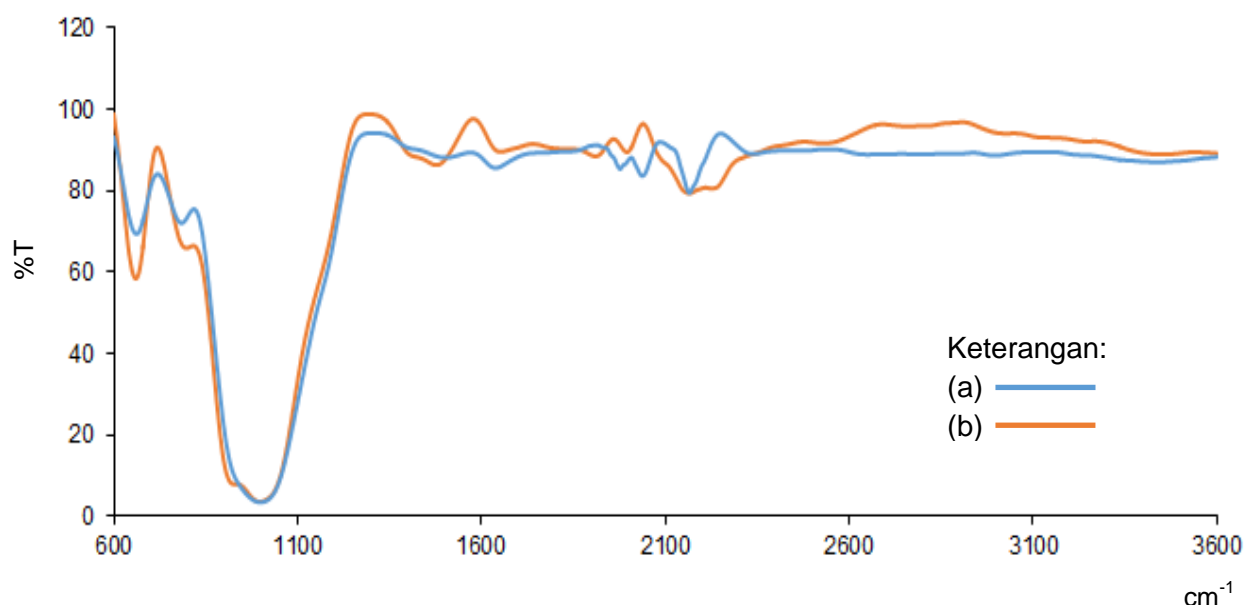
Gambar 2. Pola difraktogram sintesis zeolit analsim pada suhu 150°C (a) dan 190°C (b)

Kesesuaian puncak 2θ zeolit sintetik hasil penelitian dengan zeolit analsim ditunjukkan dengan munculnya puncak $2\theta = 15,81^\circ$; $25,96^\circ$; $30,54^\circ$ yang merupakan ciri khas dari karakteristik zeolit analsim (JCPDS Nomor. 41-1478). Hasil data penelitian dari analisis XRD menunjukkan suhu 150°C dan 190°C memiliki kesamaan puncak 2θ dan keduanya merupakan zeolit analsim. Hasil ini juga menunjukkan perbedaan suhu yang digunakan pada proses sintesis ternyata tidak memberikan pengaruh perbedaan hasil sintesis. Namun, berdasarkan pertimbangan penghematan energi dalam proses sintesis, penggunaan suhu 150°C lebih dipilih daripada 190°C.

Karakterisasi Zeolit Analsim dengan *Fourier Transform Infrared (FTIR)*

Zeolit sintetik yang telah diperoleh dari hasil penelitian dikarakterisasi dengan FTIR untuk mengetahui karakterisasi serapan bilangan gelombang oleh zeolit sintetik. Spektra zeolit analsim berdasarkan analisis dengan FTIR ditunjukkan pada Gambar 3.

Berdasarkan hasil spektra FTIR pada Gambar 3 (a), terdapat serapan pada bilangan gelombang $661,95\text{ cm}^{-1}$ yang menunjukkan karakter zeolit analsim yaitu adanya ikatan vibrasi dari tetrahedral T-O (T=Si, Al) dan serapan bilangan gelombang pada $784,62\text{ cm}^{-1}$ yang menunjukkan adanya vibrasi simetri *stretching* ikatan T-O serta serapan bilangan gelombang $999,25\text{ cm}^{-1}$ yang menunjukkan adanya vibrasi asimetri *stretching* untuk ikatan T-O dengan. Serapan pada bilangan gelombang $3440,61\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan adanya *stretching* dari kelompok O-H (Azizi, *et al.*, 2014). Hal ini mengindikasikan bahwa adanya ikatan T-O (T=Si/Al) yang khas dari zeolit analsim. Banyaknya ikatan yang terbentuk tergantung dari muatan kation yang digunakan. Contohnya dalam penelitian ini apabila 2 atom Si diganti oleh 2 atom Al maka terbentuk 2 muatan negatif dan kation yang dibutuhkan untuk menstabilkannya ialah kation Na^+ . Sesuai dengan rumus empiris dari zeolit analsim yaitu $(\text{Na}_{16}[\text{Al}_{16}\text{Si}_{32}\text{O}_{96}]\cdot 16\text{H}_2\text{O})$ dan dinyatakan sebagai unsur-unsur yang telah berikatan membentuk kristal.



Gambar 3. Spektra inframerah padatan hasil sintesis zeolit analsim pada suhu 150°C (a) dan 190°C (b)

Hasil spektra FTIR pada Gambar 3 (b) menunjukkan spektra zeolit analsim hasil sintesis pada suhu 190°C. Spektra tersebut menunjukkan pergeseran yang mirip dengan spektra pada Gambar 3(a) sebelumnya, yaitu terdapat serapan pada bilangan gelombang 660,01 cm^{-1} dan 997,21 cm^{-1} , namun ada pergeseran. Pergeseran tersebut mengalami penurunan bilangan gelombang dari persen transmittan yang dihasilkan yakni 58,30% dan 3,33%. Seperti yang telah dilaporkan Purbaningtias dan Prasetyoko (2010) semakin besar persen transmittan, semakin tinggi struktur/gugus fungsi yang terbentuk. Selain itu, pada panjang gelombang 3455,70 cm^{-1} mengalami pergeseran dengan peningkatan persen transmittan 88,82%. Pergeseran tersebut diduga karena terjadinya pertukaran kation alkali tanah oleh *template organik* yang mempengaruhi panjang ikatan Si-O dan Al-O (Taslimah, *et al.*, 2003). Analisis spektra FTIR hasil penelitian menggunakan suhu 150°C dan 190°C memiliki kesamaan gugus fungsi yang dihasilkan dari zeolit analsim standar. Hal ini menjadikan zeolit analsim dalam pembentukannya dapat menggunakan suhu sintesis 150°C dan 190°C. Selain itu, bila dibandingkan suhu sintesisnya 150°C jauh lebih besar daya serap panjang gelombang dan persentase transmittan terhadap 190°C.

SIMPULAN

Zeolit analsim sintetis dari limbah kaca yang dihasilkan berupa padatan berwarna putih. Difraktogram XRD menunjukkan sintesis zeolit sintetis pada suhu 150°C memiliki posisi 2θ yaitu pada 2θ : 15,74°; 25,89°; 30,48° dan struktur kristal yang terbentuk dalam bentuk *cubic*. Analisis dengan FTIR menunjukkan penyerapan pada bilangan gelombang 661,95 cm^{-1} (vibrasi tetrahedral T-O, T=Si/Al), 999,25 cm^{-1} (vibrasi asimetris T-O) dan 3440,61 cm^{-1} (O-H *stretching*).

DAFTAR PUSTAKA

- Ali, E.E. and Al-Tersawy, S.H., 2012, Recycled Glass as a Partial Replacement for Fine Aggregate in Self Compacting Concrete, *Construction and Building Materials*, 35:785-791.
- Arabani, M., 2011, Effect of Glass Cullet on the Improvement of the Dynamic Behaviour of Asphalt Concrete, *Construction and Building Materials*, 25:1181-1185.
- Azizi, S.N. Ghasemi, S. and Gilani, N.S., 2014, An electrode with Ni(II) loaded analcime zeolite catalyst for the electrooxidation of methanol, *Chinese Journal of Caralysis*, 35(3):383-390.

- Chester, A.W. and Derouane, E.G., 2009, *Zeolite Characterization and Catalysis: A Tutorial*, 2010th ed. Springer, New York, 176-179.
- Coleman, N.J. Li, Q. and Raza, A., 2013, Synthesis, Structure and Performance of Calcium Silicate Ion Exchangers from Recycled Container Glass, *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 50:5-16.
- Fabiani, A.V. 2014, *Sintesis dan Karakterisasi Zeolit ZSM-5 pada Suhu Rendah Menggunakan Prekursor Silika Alam*, Thesis, Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Handoyo, K., 1996, Kimia Anorganik, *Gajah Mada University Press*, Yogyakarta.
- Hariyanti D., 2015, *Utilisasi Produksi Kaca Masih Normal*, www.Industri.bisnis.com, diakses pada tanggal 21 September 2015.
- Jin, W. Meyer, C. and Baxter., 2000., "Glascrete"-Concrete with Glass Aggregate, *ACI Material Journal*, 97(2):208-213.
- Juniantoro, F.E. Hartanto, D. dan Prasetyoko, D., 2014, Sintesis Analsim dari Kaolin secara Langsung: Pengaruh Suhu dan Waktu Kristalisasi, *Jurnal Sains dan Seni POMITS*, 2(1):1-8.
- Korkosz, A. Ptaszynska, A. Hanel, A. Niewiadomski, M. and Hupka, J., 2012, Cullet as Filter Medium for Swimming Pool Water Treatment, *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 48:295-301.
- Mozgawa, W. Krol, M. and Barczyk, K., 2011, FT-IR Studies of Zeolites from Different Structural Groups, *CHEMIK*, 65:667-674.
- Safitri, M.N., 2012, *Sintesis Silika Gel Fasa Terbalik untuk Kromatografi Kolom dari Limbah Kaca*. Skripsi, Universitas Tanjungpura, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Pontianak.
- Schmidt, H., 1988, *Chemistry of Material Preparation by Sol-Gel Process*. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 100:51-64.
- Shiralkar, V.P. and Clearfield A., 1989, Synthesis of the Molecular Sieve ZSM-5 Without the Aid of Templates, *Zeolites*, 9:363-370.
- Taslimah, Muharam, S., dan Sumardjo, D., 2003, Pemerangkapan Garam Ammonium dalam Zeolit, *JSKA*, 6(2):1-5.
- Waluyo, N. Ginting, S.Br. dan Saputra, H., 2013, Penentuan Rasio Mol SiO₂/Al₂O₃ Terbaik Pada Sintesis ZSM-5 dari Zeolit Alam Lampung (ZAL) dengan Sumber Silika Penambah Bagasse Fly Ash (BFA) menggunakan Template Tetra Propyl Ammonium Bromide (TPABr), Seminar Nasional Sains dan Teknologi V, UNILA, Lampung.
- Warsito, S. Sriatun dan Taslimah., 2008, *Pengaruh Penambahan Surfaktan Cetyltrimethylammonium Bromide (N-CTAB) pada Sintesis Zeolit Y*. Seminar Tugas Akhir S1. Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Diponegoro, Semarang.
- Weitkamp, J. dan Pupe, L., 1999, *Catalysis and Zeolites Fundamental and Application*, Berlin, Germany.
- Zhely, N.H.M. dan Widiastuti, N., 2012, Sintesis Zeolit X-karbon dari Abu Dasar Batubara dan Karakterisasinya sebagai Material Penyimpan Hidrogen. *Prosiding Kimia FMIPA-ITS*. Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Zhu, H., Chen, W., Zhou, W., and Byars, E.A., 2009, Expansion Behavior of Glass Aggregates in Different Testing for Alkali Silica Reactivity, *Materials and Structures*, 42:485-494.